



УДК 552.577.082:[53+543]

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГИДРОФОБНО-МОДИФИЦИРУЮЩИХ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА МАССОПЕРЕНОС И КОАГУЛЯЦИОННОЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В ТОРФЯНЫХ СИСТЕМАХ

Мисников О.С., Купорова А.В.

Тверской государственный технический университет



### Информация о статье

Поступила:  
25 марта 2024 г.

Рецензирование:  
26 октября 2024 г.

Принята к печати:  
11 ноября 2024 г.

### Ключевые слова:

кусковой торф,  
гидрофобизация, формование,  
сушка, интенсивность сушки,  
массоперенос,  
структурообразование,  
прочность.

### Аннотация.

Продолжительность сушки – это основной параметр, определяющий эффективность торфяного производства. Снижение зависимости от неблагоприятных погодных факторов в полевых условиях возможно за счет применения гидрофобной модификации торфомассы в процессе ее диспергирования перед формованием кускового торфа. Проведена оценка влияния гидрофобной обработки торфомассы водной эмульсией этилгидросилоксана на интенсивность сушки и изменение прочности кускового торфа в диапазоне от формовочного до равновесного влагосодержаний. Экспериментально установлено отсутствие отрицательных эффектов в массообменных процессах, протекающих при обезвоживании модифицированных торфяных систем. Теоретически обосновано снижение прочности при коагуляционном структурообразовании образцов формованного торфа. Величина снижения прочности не является критичной для технологий торфяного производства. Установлен дополнительный положительный эффект от применения гидрофобизатора – снижение начальной влажности формования кускового торфа. Проведенные исследования являются научной основой для увеличения эффективности технологии производства кускового торфа в полевых условиях.

---

**Для цитирования:** Мисников О.С., Купорова А.В. Оценка влияния гидрофобно-модифицирующих кремнийорганических добавок на массоперенос и коагуляционное структурообразование в торфяных системах // Техника и технология горного дела. – 2024. – № 4(27). – С. 47-65. – DOI: 10.26730/2618-7434-2024-4-47-65

---

### Введение

Основным лимитирующим процессом в технологиях добычи и переработки торфа является сушка торфяного сырья и (или) продукции на его основе, причем на полевую сушку торфа за счет возобновляемой солнечной энергии может затрачиваться до 90 % времени технологического цикла. Это в первую очередь относится к получению формованной торфяной продукции непосредственно на предварительно подготовленных технологических площадях торфяного месторождения (кусковой торф, укрупненные частицы, гранулированные мелиоранты и т. п.). Естественно, здесь возникают серьезные риски, связанные с природными особенностями региона, определяющими климатические условия, в которых реализуется та или иная технология. Необходимо подчеркнуть, что задачам, решаемым для обеспечения технологически и экономически обоснованного обезвоживания полезных ископаемых, уделяется большое внимание и в других направлениях горнодобывающих и перерабатывающих производств [1, 2].

В отличие от фрезерной технологии добычи торфа, эффективность которой при прочих равных условиях увеличивается при снижении начального (эксплуатационного)



влажностерержания, при производстве формованной продукции (кусковой торф) необходимо строго соблюдать оптимальные влажностные параметры. При таких параметрах обеспечивается требуемый диапазон предельного сопротивления сдвигу торфомассы, при котором происходит ее формование с образованием первичной структуры (пространственной сетки) из твердой фазы, элементы которой взаимодействуют через прослойки воды. В этой связи в технологии необходимо в начале соблюдать значения относительной влажности не менее 82% ( $\approx 4,56$  кг воды на 1 кг сухого вещества торфомассы), а затем ее понижать в процессе сушки до 35...40% ( $\approx 0,54...0,67$  кг воды на 1 кг сухого вещества).

Совершенно очевидно, что, во-первых, эффективность полевого производства формованной продукции на основе торфа будет увеличиваться при технологически обоснованном уменьшении начальной влажности. Оно не должно приводить к критическому снижению качества первичной структуры, оказывающего, в свою очередь, влияние на процесс структурообразования при сушке от начального до конечного влажностерержаний. А во-вторых, необходимо снижение зависимости технологического процесса от неблагоприятных метеорологических условий (атмосферных осадков). Одним из наиболее перспективных подходов для решения этих задач является модифицирование торфомассы перед ее формованием гидрофобными добавками [3-5], которые оказывают на дисперсные системы [6] пластифицирующее воздействие и должны сформировать в процессе сушки водоотталкивающие защитные пленки на структурных элементах торфяных кусков.

Таким образом, целью работы является оценка влияния модифицирующих составов на влагоперенос и структурообразование при сушке формованных торфяных систем при ожидаемой высокой эффективности их гидрофобной обработки.

### **Ретроспективный анализ и современное состояние применения гидрофобизаторов в торфяном производстве**

Применение методов гидрофобной модификации к продуктам переработки торфяного сырья позволяет переводить их из разряда преимущественно гидрофильных материалов в состояние повышенной водоотталкивающей способности. Причем это касается как пористой поверхности торфяных систем, так и их внутренней структуры – движение капельножидкой влаги в них предельно затрудняется (в идеальном варианте прекращается). Однако, как показывает практика работы с минеральными вяжущими компонентами и строительными материалами на их основе, гидрофобная поверхность не является препятствием для воздуха с водяными парами. После его проникновения в пористое пространство формируются центры сорбции влаги, на которых происходит дальнейшая конденсация пара. Постепенно стойкость таких материалов по отношению к воде будет снижаться. Эффективность модификации в этом случае будет зависеть от целостности изоляции пористой структуры и отсутствия «разрывов» в водоотталкивающих пленках. Этого добиться даже применительно к минеральным материалам очень сложно, а для торфяных (органических) систем практически невозможно (по крайней мере, экономически обоснованными способами).

Ряд изначально не проницаемых для влаги покрытий также не проявляет абсолютной водостойкости, и при длительных циклах смачивания водой они будут разрушаться. Разрушение происходит вследствие большей или меньшей растворимости в воде, а также взаимодействия изолирующих материалов с влагой и растворенными компонентами. В то же время даже соединения из разряда гидрофобных материалов могут разрушаться в процессе химических превращений. Таким образом, со временем будет происходить так называемая гидрофилизация обрабатываемой поверхности. То есть гидрофобная модификация существенно улучшает защиту материалов от негативного воздействия воды, но не является панацеей, особенно при больших сроках хранения или эксплуатации материалов (особенно в неблагоприятных условиях).

Гидрофобность различных видов химических соединений обусловлена относительно слабыми силами межмолекулярного взаимодействия. К таким соединениям относятся углеводороды, жиры, соединения углерода с фтором, органосилоксаны и другие их производные.

Физико-химический метод образования стабильных гидрофобных пленок основан на наличии в составе поверхностно-активного вещества (ПАВ) полярной активной группы и



гидрофобного углеводородного радикала. Эти ПАВ могут иметь как органическую (абиетиновая, олеиновая кислота, мылонафт, асидол и т. п.), так и органоминеральную (кремнийорганические соединения) природу. Причем кремнийорганические модификаторы могут быть представлены как низко-, так и высокомолекулярными соединениями, имеющими в своем составе кремний (обуславливает термостойкость) и углерод (формирует гидрофобизирующую способность посредством углеводородного радикала). Этим объясняется универсальность и широкое направление областей применения органоминеральных гидрофобизаторов в нашей стране и за рубежом [3-12] для водоотталкивающей обработки материалов, равно как и для создания термостойких покрытий [13-18].

Гидрофобная обработка торфа в ряде случаев необходима по той причине, что в составе его органической части содержится сравнительно небольшое количество углеводородных битумных соединений. Ведь по своей природе торф является гидрофильным органическим (или органоминеральным) биологическим ресурсом, свойства которого могут изменяться под воздействием различных факторов. Например, это может быть частичная гидрофобизация при сушке в полевых условиях (температура не выше 50°C) или более радикальный вариант приобретения водоотталкивающих свойств при термическом воздействии более 150...200°C, то есть совершенно очевидно, что наибольшее воздействие различные негативные факторы окружающей среды будут оказывать на гидрофильные органические материалы [19, 20] (проникновение влаги в поры материала, циклы замораживания и оттаивания, увлажнения и высыхания, термическое разложение при природных пожарах и т. п.).

Гидрофобизация позволяет решать большую часть этих проблем, но определяющим аргументом здесь должна быть экономическая эффективность. Поэтому при реализации технологии необходимо использовать промышленно выпускаемые гидрофобные модификаторы, совместимые с обрабатываемым материалом, которые существенно не увеличивали бы себестоимость готовой продукции.

Впервые в торфяном производстве гидрофобизаторы применили в 1928 году при получении торфяных теплоизоляционных плит [21, 22]. Здесь кроме «мокрого» использовался и метод «сухого» прессования торфа в смеси со стекольными добавками и связующими (битумы, гудрон, смолы и т. п.). Необходимо отметить, что эффект гидрофобизации при таком подходе был незначительным, существенно понижалась биостойкость изделий при общей тенденции к повышению себестоимости.

Опыт использования органических высокомолекулярных соединений при обработке торфа твердофазными соединениями показал более высокий эффект, но необходимо было резко повышать концентрацию гидрофобизатора, а также осуществлять дополнительные технологические операции по его плавлению, равномерному перемешиванию и распылению (качества которого также добиться довольно сложно), что также не способствовало экономической эффективности.

Еще одним серьезным теоретически значимым и экспериментально проработанным направлением исследований являлось использование в качестве гидрофобизаторов тонкодисперсных водных эмульсий различных видов смол, продуктов на их основе, а также отходов переработки. По состоянию на период 50-60-х годов прошлого века они уже достаточно хорошо себя зарекомендовали в дорожном строительстве [23], производстве стройматериалов [24], получении топливных брикетов [25] и в других направлениях [26].

Обработка торфяных формованных изделий (в частности, торфяных плит) эмульгированными гидрофобизаторами приводит к существенному упрощению технологических схем их производства. Основными преимуществами здесь является обеспечение равномерного распределения модификаторов в структурных элементах материала, а также заметное снижение энергозатрат на обработку [27, 28]. Наилучшие показатели эффективности гидрофобизации были зафиксированы при использовании эмульсий парафина и смеси парафина с канифолью. Однако в данной технологии применялась традиционная обработка уже высушенных плит и эффект гидрофобизации был ожидаем – суточное водопоглощение жидкой фазы снижалось на 35...40% [28].



Более качественные показатели радикального снижения объемной влагоемкости (65...70%) были установлены для эмульсий типа «масло – вода». Однако они имели достаточно сложный состав и способ приготовления. Один из вариантов [26, 27] представлял собой смесь ингредиентов олеиновой кислоты (2%), канифоли (2%), «сырого» битума (12%), парафиновой фракции кислых масел (5%), 30%-ного раствора гидроксида калия (4%) и воды (75%). В то же время использование этой эмульсии приводило к повышенному расходу ингредиентов, а технологически значимая дозировка в 6...8% являлась причиной возникновения неприятного специфического запаха. Более того, часть гидрофобизирующей эмульсии в конечном продукте терялась. Это происходило по причине удаления эмульсии с водой отжима (что является особенностью технологии «мокрого» формирования торфяных плит [26, 27]) и приводило к росту себестоимости готовой продукции.

Наряду с объемной в различных отраслях промышленности используется также и поверхностная гидрофобизация. К основным недостаткам такого метода относят «старение» покрывных и пропиточных составов, особенно при длительном воздействии капельножидкой влаги. В этом случае дополнительно происходит разрушение связей с поверхностью материала. Более того, ряд исследователей считают, что закупорка пор нарушает циркуляцию и испарение влаги, что также может вызывать разрушение материала при изменении внешних параметров.

Таким образом, для торфяного производства, в котором широко применяется экструзия влажной вязкопластичной торфомассы (кусковой торф, гранулированные удобрения, мелиоранты, сорбенты, полуфабрикаты для пиролиза и т. п.) [29, 30], перспективным является способ внесения гидрофобизирующих составов непосредственно в состав сырья на этапе его подготовки к формованию (перемешивание, дробление и т. п.). В этом случае полностью сохраняются все действующие компоненты в структуре обрабатываемого материала после испарения воды при сушке. Исходя из предварительной оценки эффективности, в качестве гидрофобных модификаторов предлагается использовать некоторые из видов кремнийорганических соединений.

### Методика проведения экспериментов

Сырьем для получения экспериментальных образцов являлся верховой магелланикум-торф (степень разложения  $R_T = 5...10\%$ ) и переходный осоково-сфагновый (степень разложения  $R_T = 35\%$ ), добываемый на месторождениях соответственно «Заплюсские Мхи» (Псковская обл., Плюсский р-н) и «Куровское» (Тверская обл., Старицкий р-н). Сравнительно широкий диапазон степеней разложения позволяет проанализировать действие гидрофобизирующих добавок при количественном изменении ключевых компонентов (гуминовые вещества, гемицеллюлоза и целлюлоза) группового химического состава торфа (Таблица 1).

Таблица 1. Групповой химический состав органического вещества торфяного сырья  
Table 1. Group chemical composition of organic matter of peat raw materials

Тип и вид торфа	Степень разложения, %	Битумы, %	Гуминовые вещества <sup>1</sup> , %	Гемицеллюлоза, %	Целлюлоза, %	Лигнин, %
Верховой, магелланикум	5...10	1,5	22,2	45,2	20,3	10,8
Переходный, осоково-сфагновый	35	5,6	65,6	16,1	5,5	7,2

С точки зрения адаптации в реальный технологический процесс самым подходящим вариантом гидрофобизатора мог бы быть использован представитель органилсиликонатов натрия – метилсиликонат натрия (кремнийорганическое соединение ГКЖ-11) [8-10]. Основанием для его возможного применения является технологичность внесения (он растворим в воде), а также щелочная реакция раствора, что позволяет прогнозировать увеличение

<sup>1</sup> Гуминовые вещества представлены суммой гуминовых и фульвовых кислот.

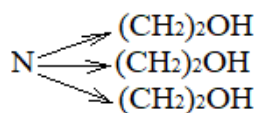




прочности формованного торфа. Однако предварительный теоретический и экспериментальный анализ показал низкую водоотталкивающую способность обработанных им образцов торфа. Она связана с образованием в торфяных системах водорастворимых гуматов натрия [32, 33], которые практически полностью нивелируют гидрофобный эффект от применения ГКЖ-11.

Поэтому в качестве гидрофобизатора в экспериментах было обосновано использование нерастворимой в воде полиорганосилоксановой жидкости – этилгидросилоксана (ЭГС), которая выпускается промышленностью под маркой ГКЖ-94 [8-10]. Преимущество ЭГС – универсальность при обработке широкого класса дисперсных и капиллярно-пористых материалов. Этот модификатор показал свою высокую эффективность по водоотталкивающим свойствам, отсутствие коррозии, практическую безвредность для биологических систем, а также ряд других менее значимых качественных характеристик. В то же время, как было отмечено выше, его основным недостатком при обработке изначально влагоемкого материала (торфа) является нерастворимость в воде (хорошо растворяется в ароматических или хлорированных углеводородах: бензине, уайт-спирите, бензоле, толуоле и т. п.). В связи с этим перед обработкой торфомассы применялось его предварительное эмульгирование в водной среде.

Эмульгатором являлся хорошо растворимый в воде триэтаноламин (НО-СН<sub>2</sub>СН<sub>2</sub>)<sub>3</sub>N (ТЭА) со структурной формулой:



ТЭА является органическим соединением, довольно широко используемым для интенсификации помола, в шаровых мельницах (например, для производства цемента) или в качестве подщелачивающего агента в косметических средствах и в других направлениях.

Для получения гидрофобно-модифицированных образцов формованного торфа в торфяную массу (относительная влажность 70...75%) вносили водные растворы или водные эмульсии концентрациями 0,5...4% кремнийорганической жидкости (действующего вещества) на сухое вещество торфа. При обосновании концентрации гидрофобизаторов исходили из условия минимизации их использования в контексте перспектив экономической эффективности разрабатываемых технологий.

Из подготовленного композиционного сырья на грануляторе [31] методом экструзии формовались цилиндрические образцы диаметром  $d = 40$  мм и длиной  $l = 60$  мм из условия  $l = 1,5 d$ . Такое соотношение длины и диаметра соответствует размерам промышленно производимого в полевых условиях кускового торфа. Перед формованием для стабилизации качественных характеристик торфомассы по всему объему производилось ее предварительное однократное механическое диспергирование без использования формующего мундштука. К основным качественным характеристикам относятся влажность, зольность, дисперсность, распределение модификатора и др. Затем на гранулятор устанавливался мундштук и проводилось формование диспергированной торфомассы с дальнейшей сушкой полученных экспериментальных образцов.

Сушка осуществлялась на подносах из нержавеющей стали в конвективном режиме при температуре  $t = 22 \pm 3^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $\varphi = 75 \pm 10\%$ . В процессе сушки от начального до равновесного влагосодержания осуществлялся контроль основных физико-механических характеристик образцов (масса, размеры, прочность, плотность) в соответствии с комплексной методикой изучения процесса их сушки и структурообразования [29, 34, 35].

## Результаты исследований и их анализ

Для оценки влияния гидрофобных добавок на процесс обезвоживания исследуемых видов торфа в первую очередь были проанализированы кривые сушки (Рис. 1, 2). Здесь хорошо заметно, что при увеличении степени разложения ( $R_T$ ) торфяного сырья происходит ряд важных изменений. Во-первых, это относится к начальному влагосодержанию, при котором производится формование гранул: для верхового торфа с низкой  $R_T$  оно варьирует от 4,60 кг/кг



до 4,83 кг/кг (Рис. 1). Для используемой методики [29, 34, 35] этот показатель находится в пределах ошибки измерения, то есть не наблюдается влияния гидрофобизирующего агента на подвижность формируемой торфомассы (по крайней мере, в диапазоне используемых концентраций агента). Для переходного торфа с высокой степенью разложения (Рис. 2) при увеличении концентрации модифицирующей добавки влагосодержание формирования ( $W_f$ ), оно же начальное влагосодержание ( $W_n$ ) заметно снижается с 3,33 кг/кг до 2,39 кг/кг. Здесь нужно обратить внимание на то, что во всех типах и видах торфа с низкой  $R_T$   $W_f$  всегда выше из-за более высокой пористости и меньшего содержания органического связующего компонента (гуминовых веществ, см. Таблицу 1).

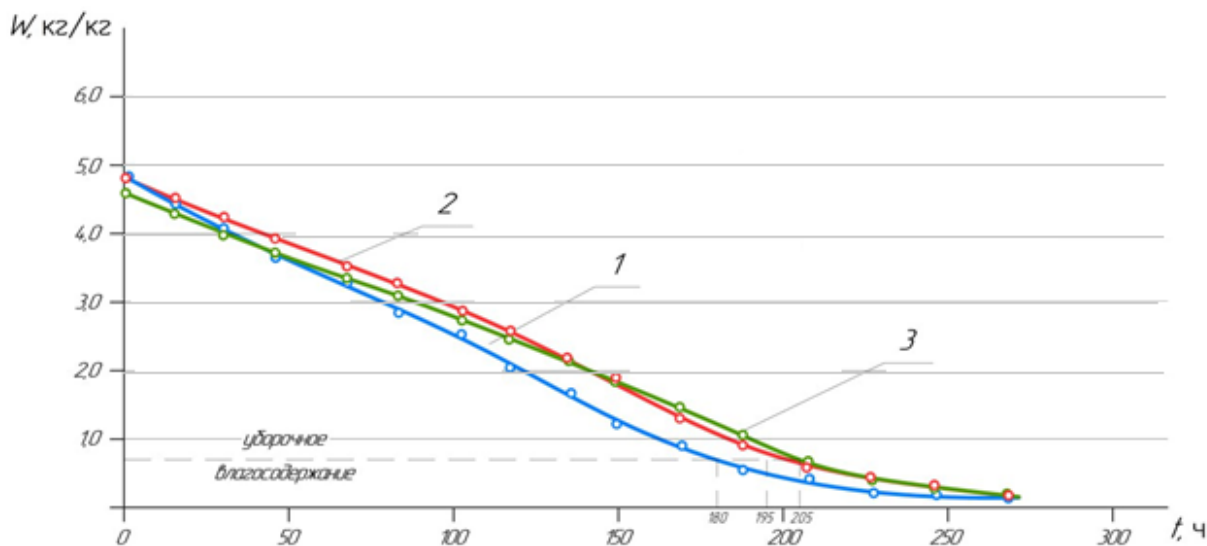


Рис. 1. Кривые сушки образцов контрольного формованного кускового торфа (1) (верховой тип,  $R_m = 5...10\%$ ) и с использованием добавок этилгидросилоксана с концентрациями 2 % (2) и 4% (3)

Fig. 1. Drying curves of samples of control molded lump peat (1) (top type,  $R_t = 5...10\%$ ) and with the use of ethylhydrosiloxane additives with concentrations of 2% (2) and 4% (3)

Поэтому совершенно очевидно, что и время сушки до равновесного влагосодержания ( $W_p = 0,2$  кг/кг) торфа с низкой  $R_T$  гораздо больше – 260 часов (применительно к технологии добычи – 26 суток). Время сушки до уборочной влажности ( $w_{уб} \approx 40\%$ ,  $W_{уб} = 0,7$  кг/кг) составляет примерно 180 часов (18 суток). Характерно, что и кривые сушки для этого типа торфа (а также его модифицированных композиций) в процессе обезвоживания не изменяются. Из этого можно сделать вывод о практическом отсутствии влияния добавки этилгидросилоксана (в исследуемом диапазоне концентраций) на процесс влагопереноса.

Анализ зависимости  $W = f(t)$  для формованных образцов переходного торфа с высокой  $R_T$  показывает совершенно иную картину процесса (Рис. 2). Равновесного влагосодержания образцы достигают за 200 часов, а уборочного – за 120 часов. Это ниже соответственно на 29% и 34% по сравнению с верховым слабообразованным торфом (Рис. 1). Для этого образца уже заметно влияние кремнийорганического гидрофобизатора на протяжении всего процесса сушки: сокращение времени обезвоживания по мере увеличения концентрации на участке от начального до уборочного влагосодержания с постепенным снижением этого влияния в зоне влагосодержаний близких к  $W_p$ . Применительно к технологии добычи важен именно участок от  $W_n$  до  $W_{уб}$ , поскольку он лимитирует продолжительность технологического цикла производства кускового торфа.

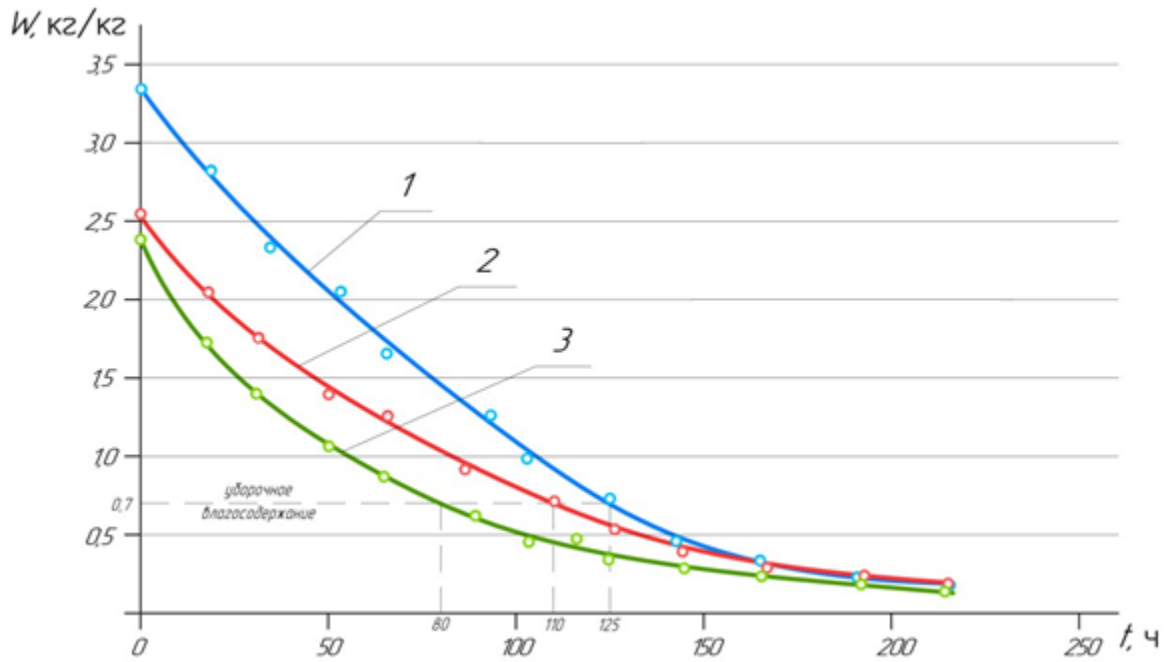


Рис. 2. Кривые сушки образцов контрольного формованного кускового торфа (1) (переходный тип,  $R_m = 35\%$ ) и с использованием добавок этилгидросилоксана с концентрациями 2 % (2) и 4 % (3)

Fig. 2. Drying curves of samples of control molded lump peat (1) (transitional type,  $R_t = 35\%$ ) and using ethylhydrosiloxane additives with concentrations of 2 % (2) and 4 % (3)

Интенсификация процесса сушки служит серьезным аспектом повышения эффективности технологии, но не главным. Основным фактором все же является уменьшение  $W_\phi$ , которое в дальнейшем радикально сокращает продолжительность процесса сушки, поскольку позволяет снизить на 0,8...1,0 кг количество удаляемой воды в пересчете на 1 кг сухого вещества.

Анализ графика интенсивности сушки (Рис. 3) позволяет более глубоко изучить физику обезвоживания контрольного и композиционных гидрофобно-модифицированных составов и получить детальную картину массообменных процессов в формованном капиллярно-пористом материале.

На кривых интенсивности выделяются период постоянной интенсивности сушки от  $W_n$  до первого критического влагосодержания  $W_{к1}$  и период убывающей интенсивности от  $W_{к1}$  до  $W_p$  с промежуточной точкой, соответствующей второму критическому влагосодержанию  $W_{к2}$ . Эти периоды обусловлены особенностями капиллярно-пористой структуры формованного торфа, а также фазовым состоянием влаги в процессе массопереноса в системе [34, 35]. Характер изменения интенсивности сушки для исследованных типов и видов торфа (график интенсивности сушки для верхового торфа с  $R_T = 5...10\%$  не приведен) в исследуемых образцах находится в полном соответствии с физико-химическими основами торфяного производства [32, 33]. При разнонаправленном изменении величины интенсивности сушки в модифицированных образцах по сравнению с контрольным однозначно можно сделать вывод о том, что отрицательного влияния модификатор на этот процесс не оказывает.

Обобщая результаты исследований научных школ И.И. Лиштвана [36, 37], Н.И. Гамаюнова [38, 39], А.Е. Афанасьева [40, 41] с данными, полученными авторами статьи, можно сделать вывод, что модель процесса сушки формованных влагоемких (масса воды превышает массу сухого вещества в 3 и более раз) вязкопластичных торфяных систем в диапазоне от формовочного до равновесного влагосодержания будет следующая (Рис. 4).

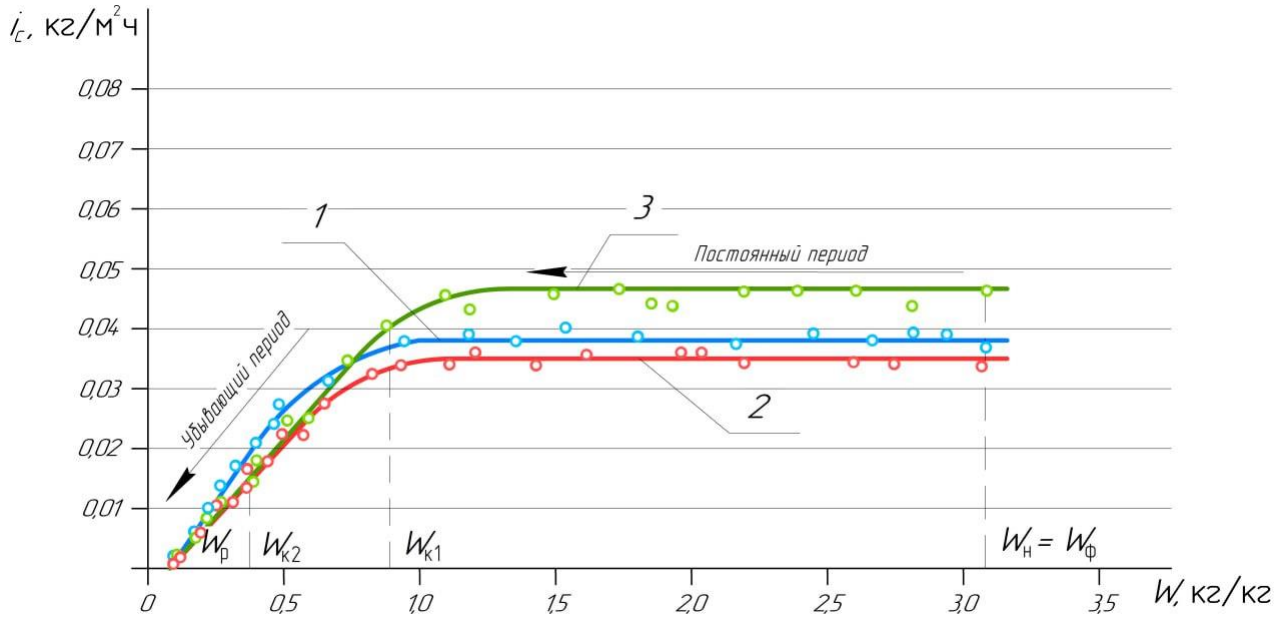


Рис. 3. Кривые интенсивности сушки образцов кускового торфа (переходный торф,  $R_m = 35\%$ ) в зависимости от концентрации (масс. %) ЭГС: 1 – 0%; 2 – 2%; 3 – 4%.  
Fig. 3. Drying intensity curves of lump peat samples (transitional peat,  $R_t = 35\%$ ) depending on the concentration (wt. %) of EGS: 1 – 0%; 2 – 2%; 3 – 4%.

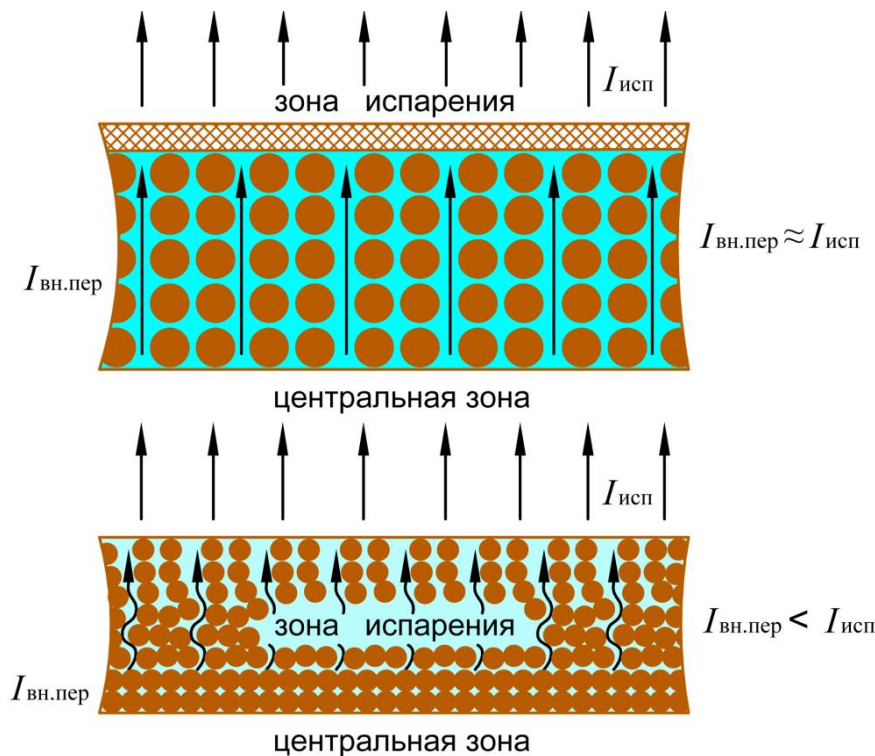


Рис. 4. Схема процесса сушки формованного торфа (экструзионный цилиндрический кусок или сферическая гранула)  
Fig. 4. Schematic diagram of the drying process of molded peat (extruded cylindrical lump or spherical pellet)

При начале процесса испарения воды с поверхностной зоны куска в ней понижается влагосодержание  $W_n$ . При этом влагосодержание в центральной зоне  $W_c$  будет выше. В соответствии с уравнением влагопроводности внутренний поток ( $I_{вн}$ ) за счет градиента





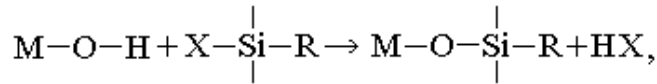
влажносодержаний будет направлен по системе капилляров из центра куска на его периферийные (поверхностные) зоны для ликвидации возникающего дефицита влаги на поверхности.

Поток влаги  $I_{\text{вн.пер.}}$  будет определяться градиентом влажностенаний ( $\nabla W$ )  $I_{\text{вн.пер.}} = -a_m \gamma_c \nabla W$ , где  $a_m$  – коэффициент диффузии влаги,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\gamma_c$  – масса абсолютно сухого вещества в единице объема влажного торфа (так называемая плотность «скелета торфа»),  $\text{кг}/\text{м}^3$  [35].

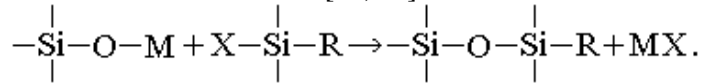
Для упрощения трактования термовлагопроводность (перенос влаги за счет градиента температур) в данной модели не учитывается, а принимается только конвективный режим сушки. При таких условиях скорости внешнего  $I_{\text{исп}}$  и внутреннего  $I_{\text{вн.пер}}$  влагопереноса будут примерно соответствовать друг другу (Рис. 4). Такая закономерность будет наблюдаться до тех пор, пока влажностенности центральной зоны будет достаточно для ликвидации дефицита воды в зоне испарения. Такой механизм обеспечивает постоянную величину испарения – постоянный период сушки (Рис. 3) от  $W_{\text{н}}$  до  $W_{\text{к1}}$ .

После истощения запаса влаги в центральной зоне формованного куска и, соответственно, невозможности ее непрерывного поступления в поверхностную зону испарения последняя будет постепенно уходить вглубь образца. Идеальный вариант – расширение зоны испарения до центральной части формованного торфа. Скорость внутреннего влагопереноса при этом будет снижаться ( $I_{\text{вн.пер}} < I_{\text{исп}}$ ) по мере уменьшения влажностенаний с постепенным преобладанием во влажностенности переноса в виде пара. На кривой интенсивности сушки эта часть убывающего периода продолжается от  $W_{\text{к1}}$  до  $W_{\text{к2}}$  и, наконец, от  $W_{\text{к2}}$  до  $W_{\text{р}}$  перенос осуществляется исключительно в виде пара. Необходимо отметить, что эта модель является упрощенным вариантом объяснения механизма сушки, поскольку не учитывает изменение коэффициента диффузии влаги [35]. Ведь совершенно очевидно, что вследствие протекания усадочных процессов будет уменьшаться размер структурных элементов (в первую очередь ассоциатов и агрегатов по И.И. Лиштвану [36]) и в целом изменяться пространственная капиллярно-пористая структура образца. Объяснению физико-химической природы протекания процессов структурообразования при сушке (и увлажнении) коллоидных капиллярно-пористых систем посвящено большое количество работ, основные из которых были систематизированы в статьях авторов [42, 43]. Естественно, что кремнийорганические добавки оказывают влияние на внутренний влагоперенос, а также количественно и качественно трансформируют межмолекулярные взаимодействия в системе. Это, в частности, подтверждает отмеченный выше факт снижения начальной влажностенности формования для высокоразложившегося торфа. Вероятнее всего, требуемая для формования подвижность (предельное сопротивление сдвигу) торфомассы обусловлена физической адсорбцией цепей этилгидросилоксана. В результате водородных взаимодействий гидрофобизатора с поверхностными гидроксильными группами гуминовых кислот (преимущественно) образуется слой, который выполняет роль смазки и снижает затраты энергии на формование. Анализ теорий, трактующих физику и химию взаимодействия кремнийорганических составов с модифицируемыми материалами [44-47], позволяет выделить две основные.

Первая основана на химической природе взаимодействия, а вторая отдает предпочтение силам Ван-дер-Ваальса в формировании гидрофобного покрытия. В основном специалисты [44-47] склоняются к теории химических взаимодействий. Их главный аргумент заключается в том, что устойчивости покрытия можно достигнуть кремнийорганическими полимерами с реакционно-функциональными группами у атома кремния. Эти группы взаимодействуют со структурными элементами обрабатываемых материалов. Однако эта теория была разработана применительно к минеральным силикатным материалам, которые имеют в своей структуре гидроксильные группы. То есть обработка этих материалов производится составами с реакционноспособными функциональными группами  $RSiX_3$ ,  $(RSiXO)_n$ ,  $R_2SiX_2$ , где  $R$  – это радикал, а  $X$  – галоген, водород или более сложное соединение типа  $OH$ ,  $NCO$ ,  $NCS$  и др. Затем эти функциональные группы при взаимодействии с поверхностными  $OH$ -группами химически фиксируют гидрофобную пленку по схеме [46, 47]:



где  $M = Al, Mg, Ca$  и т. п. Если силикатный материал имеет группы  $Si-O-M$ , то образуются новые связи  $Si-O-Si$  [46, 47]:



Однако такой механизм в полном объеме не реализуем при обработке торфяной системы, содержащей в основном органическое вещество. Допускается частичная фиксация пленок по представленным выше схемам при условии содержания силикатных материалов в минеральной составляющей торфа. Более того, при увеличении зольности торфа за счет привнесенных минеральных компонентов (водная и ветровая эрозия, минерализация при ремонте производственных площадей месторождения и т. п.) удельный вес таких схем при формировании гидрофобной поверхности будет увеличиваться.

Если же рассматривать низкозольные виды торфа, то здесь гидрофобные соединения будут связываться за счет сил Ван-дер-Ваальса и (или) сорбционных процессов на уровне их пористой структуры [32, 33]. Очевидно, что при таком механизме взаимодействия структурная прочность коллоидных капиллярно-пористых торфяных систем будет изменяться.

Для исследуемых видов торфа это подтверждается при анализе зависимости прочности цилиндрических образцов на одноосное сжатие от влагосодержания (Рис. 5, 6). Во всех экспериментах происходит снижение прочности при использовании ГКЖ-94, причем абсолютная величина прочности у торфа с высокой степенью разложения больше в 3,8...4 (в точке  $W_{y6}$ ) и 4,3...5,3 (в точке  $W_p$ ) раза по сравнению с низкоразложившимся. В технологии добычи кускового торфа эти точки являются показательными, поскольку характеризуют свойства готовой продукции при равновесном  $W_p = 0,3^2$  кг/кг и уборочном  $W_{y6} = 0,7$  кг/кг влагосодержаниях.

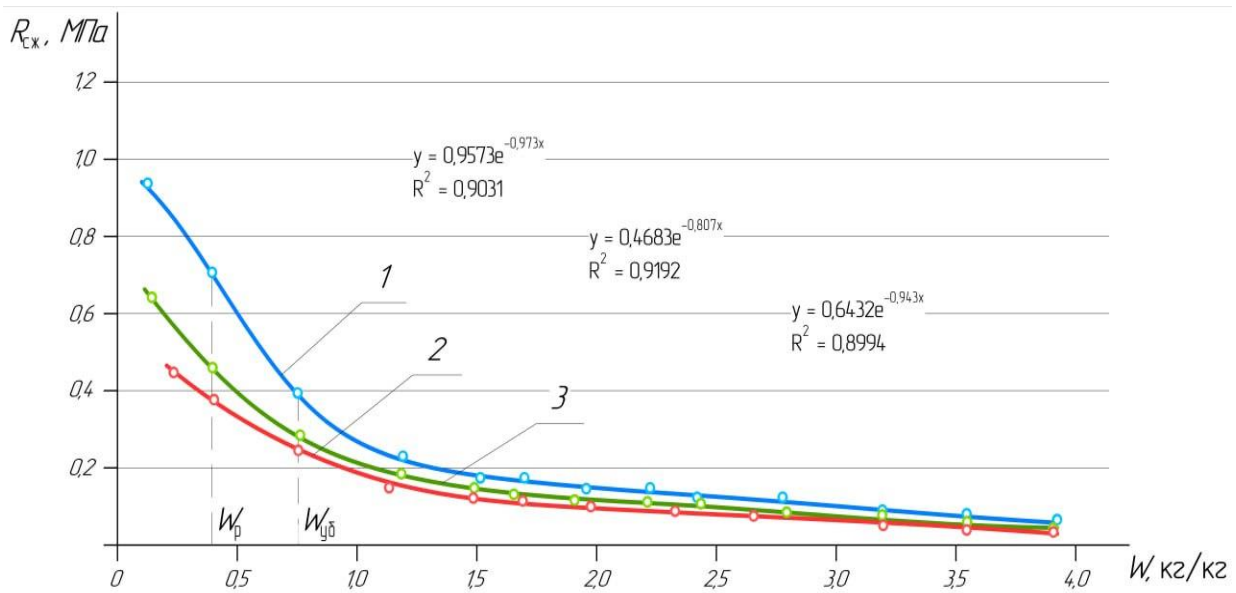


Рис. 5. Зависимость прочности на одноосное сжатие от влагосодержания кускового торфа (верховой торф,  $R_m = 5...10\%$ ) в зависимости от концентрации (масс. %) ЭГС: 1 – 0%; 2 – 2%; 3 – 4%.

Fig. 5. Dependence of uniaxial compressive strength on moisture content of lump peat (top peat,  $R_t = 5...10\%$ ) depending on the concentration (wt. %) of EGS: 1 – 0%; 2 – 2%; 3 – 4%.

<sup>2</sup> Здесь и далее для анализа приняты их фиксированные значения, поскольку в реальной технологии они будут варьировать в районе этих величин.

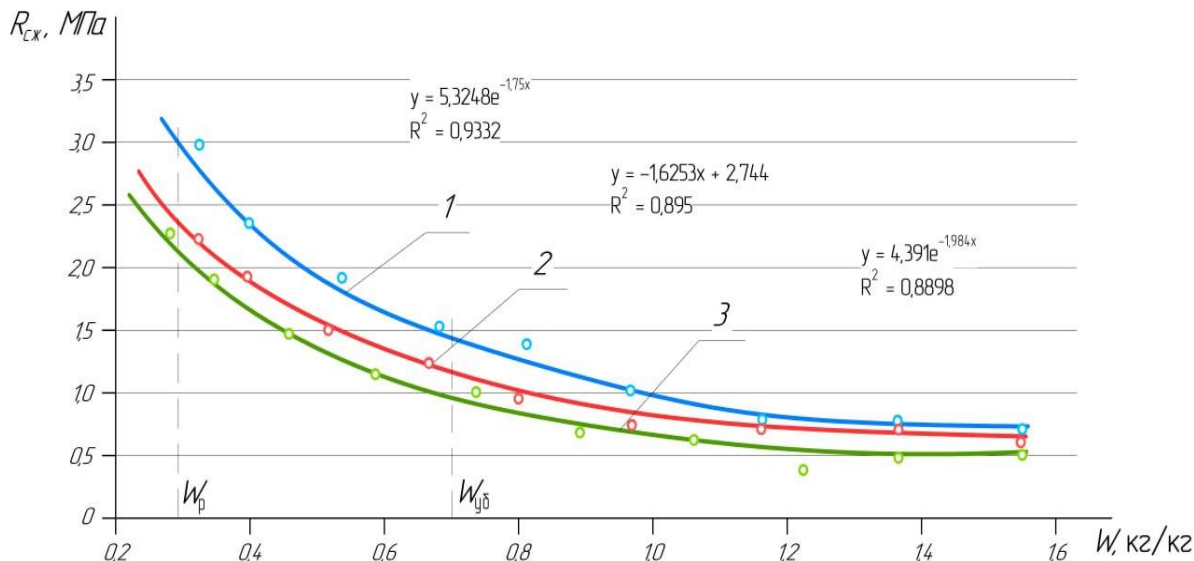


Рис. 6. Зависимость прочности на одноосное сжатие от влагосодержания кускового торфа (переходный торф,  $R_m = 5...10\%$ ) в зависимости от концентрации (масс. %) ЭГС: 1 – 0%; 2 – 2%; 3 – 4%.

Fig. 6. Dependence of uniaxial compressive strength on moisture content of lump peat (transitional peat,  $R_t = 5...10\%$ ) depending on the concentration (wt. %) of EGS: 1 – 0%; 2 – 2%; 3 – 4%.

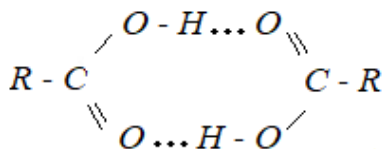
Если же более подробно проанализировать отрицательное влияние ЭГС на прочность, то для верхового торфа с низкой  $R_T$  в зоне  $W_p$  отмечается снижение этой величины на 32...48%, а при  $W_{yb}$  – на 31...44%, то есть падение прочности примерно одинаково и зависимости от величины концентрации добавки (в исследуемом диапазоне концентраций) не наблюдается.

У переходного торфа с высокой  $R_T$  прочность при  $W_p$  снижается примерно на 25%, а при  $W_{yb}$  – на 8...30%, причем здесь в отличие от предыдущего торфа выявлена строгая зависимость прочности от концентрации гидрофобизатора. Поскольку на процесс формирования прочности при сушке оказывает влияние содержание гуминовых веществ, обладающих дополнительным структурообразующим воздействием на систему, то объяснение очевидно: содержание последних в органическом веществе низко- и высокоразложившегося торфа, равно 22,2% и 65,6% соответственно (см. таблицу).

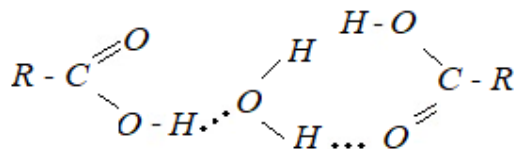
Анализ зависимости прочности от влагосодержания в полулогарифмических координатах  $\ln R = f(W)$  свидетельствует об адекватности использования модели С.С. Корчунова и А.Е. Афанасьева для определения прочности образцов в процессе их сушки  $R = R_{ow} \cdot \exp(-\lambda \cdot W)$ , где  $R_{ow}$  – максимально возможная (теоретическая) прочность при влагосодержании образца равном нулю;  $\lambda$  – коэффициент структурообразования (упрочнения структуры), определяемый экспериментально для конкретного вида торфа [40, 41].

График зависимости  $\ln R = f(W)$ , как и в ранее проведенных работах, представляет собой ломаную линию, которая сингулярной точкой  $W_c \approx 1,0...1,5$  кг/кг [40, 48, 49] разбивается на два прямолинейных участка, соответствующих двум периодам структурообразования системы. Первый период структурообразования начинается при формовочном влагосодержании ( $W_\phi \approx 3,5...4,5$  кг/кг). Превалирующее действие при формировании прочности в этом периоде осуществляют ван-дер-ваальсовы взаимодействия (индукционное, ориентационное и дисперсионное). Энергия их связи в торфяных системах сравнительно невелика и составляет от 4 до 8 КДж/моль [32, 33].

Поскольку в составе органического вещества торфа (в основном в гуминовых кислотах) присутствуют функциональные группы (ОН, СООН и др.), то в них есть потенциал к образованию между молекулами водородных взаимодействий. При этом образуются димерные, тримерные и другие подобные виды структур. Идеальный вариант – это непосредственное взаимодействие молекул по схеме [32]



но чаще всего связь осуществляется через молекулы воды,

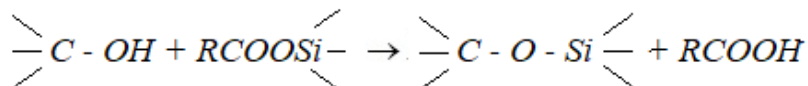


поскольку полностью высушить торф ( $W_{y6} = 0$ ) в условиях полевой технологии невозможно.

Далее в процессе сушки и приближении системы к точке  $W_c$  физический механизм структурообразования начинает изменяться, увеличивается количество межмолекулярных водородных связей, которые обладают энергией примерно в 4...10 раз выше, по сравнению с ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями (16,8...33,5 кДж/моль) [32, 33]. В связи с этим за счет лавинообразного проявления водородных связей в точке (зоне)  $W_c$  происходит скачкообразное увеличение энергии активации процесса разрушения, и система переходит на качественно новый уровень в формировании прочности [48, 49].

Априори было ожидаемо и подтверждено экспериментально – при модифицировании торфа добавкой ЭГС рассмотренный выше «классический» механизм структурообразовательного процесса [40] при сушке изменился, хотя эти изменения и не носили фундаментального характера. Молекулы ЭГС взаимодействуют как с низкоразложившимися (целлюлоза, гемицеллюлоза), так и с высокоразложившимися (гуминовые кислоты) компонентами органического вещества торфа.

На примере целлюлозы можно рассмотреть формирование гидрофобных пленок на низкоразложившихся структурных элементах торфа. Оно происходит при химическом взаимодействии активных функциональных групп кремнийорганического соединения с гидроксильными группами целлюлозы. Целлюлоза взаимодействует с этилгидросилоксаном по следующей схеме [46, 47]:



В результате этой реакции происходит образование хемосорбированного водоотталкивающего слоя – углеводородные радикалы ориентируются в противоположную изолируемым структурным элементам сторону, что и обуславливает их начальные гидрофобные свойства. Далее происходит связывание цепей целлюлозы молекулами кремнийорганического соединения с образованием трехмерных структур, что не создает условий для увеличения расстояния между целлюлозными цепями. Следовательно, проникновение воды между ними будет затруднено.

Однако такой сбалансированный механизм хемосорбции при связывании кремнийорганического покрытия реализуем только на полностью обезжиренных и высушенных поверхностях. В условиях реализуемой технологии эффективность процесса гидрофобизации будет зависеть от степени обезвоживания торфяных кусков, то есть максимальный эффект будет достигаться в конце технологического цикла и далее при хранении в складочных единицах (предпочтительный вариант – хранение в вентилируемых складских помещениях).

Вариант полного обезжиривания в торфяных системах также исключается, поскольку в них присутствуют битумные компоненты. Поэтому механизм взаимодействия целлюлозы с этилгидросилоксаном может быть реализован лишь частично. Его эффективность будет увеличиваться при снижении степени разложения торфа, что и было установлено экспериментально. На реальный процесс гидрофобизации также накладывается некий



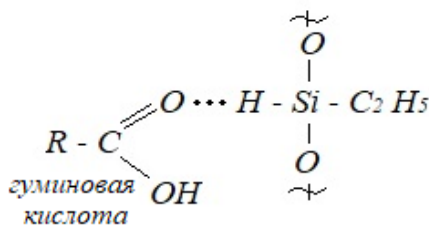


дополнительный эффект за счет частичного экранирования торфа битумными компонентами. Но, к сожалению, фрагментарное распределение битумов в торфе лишь дополняет гидрофобизацию материала, обработанного добавками ЭГС, и применительно только к тем структурным элементам, на которых проблематична реализация хемосорбционного механизма.

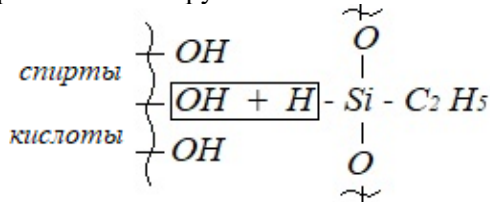
Теперь на примере гуминовых кислот проанализируем механизм формирования гидрофобных покрытий на высокоразложившихся компонентах торфа. Этот процесс протекает в две стадии. Сначала происходит физическая адсорбция (за счет водородных взаимодействий) молекул этилгидросилоксана с поверхностными *ОН*-группами гуминовых кислот – образуется мономолекулярный слой. Затем следует вторая стадия, протекающая гораздо медленнее. В диапазоне температур, используемом в полевой сушке, ее продолжительность может составить от десятков часов до нескольких дней (и даже месяцев) в конце технологического цикла и после его окончания (при достижении  $W_p$ ). На этой стадии молекулы ЭГС так же, как и в варианте с целлюлозой, присоединяются к поверхности за счет химической реакции с поверхностными гидроксильными группами [50].

Таким образом, реальный процесс гидрофобизации, адаптированный к технологии производства кускового торфа в полевых условиях (обработка суспензированным гидрофобизатором торфомассы, формование и сушка кусков) [51], осуществляется следующим образом. При испарении влаги (в нашем случае вода является растворителем) по мере приближения раствора из центральных зон к поверхности куска (см. Рис. 4) концентрация действующего вещества (ЭГС) на структурных элементах торфа будет возрастать. Максимальная концентрация будет достигаться на поверхности (или близко к поверхности) обрабатываемого материала.

Этот процесс продолжается вплоть до первого критического влагосодержания  $W_{к1}$  (Рис. 3) и в нем в основном задействован объемный механизм десорбции. При достижении куском среднего текущего влагосодержания  $W_i = W_{к1}$  в массовом порядке начинается образование водородных связей между гидроксильными группами гуминовых кислот [32, 33] с формированием мономолекулярного слоя по схеме:



Когда процесс сушки завершается ( $W_i \leq W_p$ ), возникают условия для хемосорбции молекул ЭГС с поверхностными гидроксильными группами по схеме



При  $W_i \rightarrow 0$  эффективность хемосорбционного связывания гидрофобного покрытия будет возрастать, но для полевой сушки это маловероятный вариант. В полном объеме он может быть реализован только при условии полного удаления влаги, а это возможно только в технологиях заводского производства формованной продукции на основе торфа (при искусственной досушке кусков торфа при температуре до 100°C).

Представленный выше механизм коагуляционного структурообразования при сушке формованных торфяных образцов объясняет причину частичного снижения их прочности при участии в этом процессе молекул ЭГС. Уменьшается количество водородных взаимодействий между основным связующим компонентом – макромолекулами гуминовых веществ – за счет их частичной реализации на образование связей с молекулами гидрофобизатора. В этом контексте



этилгидросилоксан является своеобразным источником образования «дефектов структуры» в торфяной системе. Однако величина потери количественных показателей прочности не является критичной по сравнению с достаточно стабильным эффектом гидрофобизации формованных торфяных систем.

### **Выводы**

Таким образом, в результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований был проведен анализ влияния кремнийорганического модификатора этилгидросилоксана на процесс сушки и структурообразования формованных методом экструзии цилиндрических образцов торфа.

Подтверждена возможность технологически обоснованного внесения предварительно эмульгированного гидрофобизатора в увлажненную торфомассу. Установлено, что модификация структуры формованного торфа не оказывает существенного влияния на внутренний и внешний влагоперенос, что не влечет за собой необходимости внесения изменений в действующие технологии его добычи и переработки.

Положительным аспектом использования модификации структуры является снижение начального влагосодержания формования торфа с высокой степенью разложения с 3,33 кг/кг до 2,39 кг/кг, что снижает временные и энергетические затраты его на сушку и в итоге увеличивает сезонный сбор этого органического ресурса. Для низкоразложившегося торфа эффект снижения формовочного влагосодержания в исследуемом диапазоне концентраций модификатора не выявлен, что связано с его высокой пористостью и необходимостью увеличения концентрации.

Использование этилгидросилоксана незначительно снижает прочность торфяной системы вследствие влияния гидрофобизатора на процесс структурообразования при сушке, а именно использования части реакционноспособных функциональных групп органического вещества для образования водородных связей с молекулами модификатора. Величина снижения прочности не критична для технологий получения формованной продукции на основе торфа.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

### **Информация об авторах**

**Мисников Олег Степанович**, д.т.н., профессор, декан факультета природопользования и инженерной экологии, заведующий кафедрой горного дела, природообустройства и промышленной экологии  
e-mail: oleg.misnikov@gmail.com

**Купорова Александра Владимировна**, канд. техн. наук, доцент кафедры технологических машин и оборудования  
e-mail: a-kuporova@inbox.ru

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22

### **Список литературы**

1. Мурко Е.В., Марков С.О., Тюленев М.А. Исследование обезвоживания угольного шлама обогатительных фабрик // Техника и технология горного дела. – 2024. – № 1(24). – С. 58-76.
2. Open pit mine wastewater filtration in the overburden rock debris: case study / E. V. Makridin, S. Markov, E. Murko, I. Ondrejmkova // E3S Web of Conferences : The 10th Anniversary Russian-Chinese Symposium “Clean Coal Technologies: Mining, Processing, Safety, and Ecology”, Kemerovo, 19–21 октября 2021 года. Vol. 303. – Kemerovo: EDP Sciences, 2021. – P. 01033. – DOI 10.1051/e3sconf/202130301033. – EDN UBBYMF.
3. Barnat-Hunek, D., Grzegorzczak-Frańczak, M., Suchorab, Z. Surface hydrophobisation of mortars with waste aggregate by nanopolymer triethoxy-isobutyl-silane and methyl silicon resin. Construction and Building Materials. 2020; 264:120175. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120175



4. Grabowska, K., Koniorczyk, M. The effect of hydrophobic treatment by organosilicon admixtures of cement mortar. *Cement, Wapno, Beton*. 2019; 2019(4):320-329. DOI: 10.32047/CWB.2019.24.4.7
5. Ghasemlou, M., Daver, F., Ivanova, E.P. [et al.] Bio-inspired sustainable and durable superhydrophobic materials: From nature to market // *Journal of Materials Chemistry A*. 2019;7(28):16643-16670. DOI: 10.1039/c9ta05185f
6. He, Y. [et al.] Mechanism and working performance of organic silicone microcapsule powder water-repellent. *Journal of Building Materials*. 2015;18(3):433-437. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2015.03.013
7. Булкаков В.Я., Лопатин Ю.Т. Гидрофобизация текстолитов полиорганосилоксанами // *Пластические массы*. – 1966. – № 1. – С. 69-70.
8. Полифункциональные элементоорганические покрытия / Под. ред. А.А. Пащенко, Киев: Вища школа, 1987. – 198 с.
9. Андреева А.Б. Пластифицирующие и гидрофобизирующие добавки в бетонах и растворах. – М.: Высшая школа, 1988. – 55 с.
10. Соболевский М.В., Музовская О.А., Попелева Г.С. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов. – М.: Химия, 1975. – 296 с.
11. Хигерович М.И., Байер В.Е. Гидрофобно-пластифицирующие добавки для цементов, растворов и бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – 179 с.
12. Кривенко Ю.Ю., Везенцев А.И. Гидрофобизация тонкодисперсного мела // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2021. – № 6. – С. 63-70.
13. Зубец В.Н., Латкин А.С., Сажин В.С., Ипполитов Е.Г., Юдаков А.А. Гидрофобизация дисперсных материалов. – Владивосток: Дальневосточное отделение АН СССР, 1987. – 170 с.
14. Изотов В.С., Соколова Ю.А. Химические добавки для модификации бетона. – М.: Палеотип, 2006. – 244 с.
15. Степанова А.И. Расчет поверхностных напряжений керамической пластины в процессе сушки // *Промышленная теплотехника*. – 1982. – № 2. – С.22-25.
16. Суворов В. И., Ходяков Г.М., Терентьев А.А. и др. Изучение влияния различных модификаций ГиПАНа на качественные показатели кускового торфа // *В кн.: Физические основы торфяного производства*. Калинин: КГУ. 1985. – С. 101-107.
17. Сокольский С.А., Федосов С.В., Сокольский А.И., Барулин Е.П. Тепловая обработка и гидрофобизация огнетушащих порошков // *Журнал прикладной химии*. – 2005. – Т. 78. – № 4. – С. 681-683.
18. Терентьев А. А., Некрашевич В.М., Некрашевич А.И., Прохоров Г.М. Структурообразование торфяных систем, модифицированных неионогенными ПАВ // *Торфяная промышленность*. – 1987. – № 1. – С. 28-30.
19. Портнов Ф.А. Гидрофобизация древесины эфирами фосфористой кислоты // *Научное обозрение*. – 2015. – № 14. – С. 167-171.
20. Шульгин А.М., Баранов О.В., Комарова Л.Г., Межуев Я.О. Модификация материалов на основе целлюлозы гидрофобным алкоксисиланом // *Клеи. Герметики. Технологии*. – 2024. – № 7. – С. 23-28.
21. Изоляционные плиты из торфа: сборник статей / под ред. Л.И. Длугацкого. – М.; Л.: Горное издательство, 1932. – 62 с.
22. Суханов М.А. Теплоизоляционные материалы из торфа // М.: – Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 75 с.
23. Колбановская А. С., Давыдова А.Р. Поверхностно-активные добавки улучшают свойства битумно-минеральных смесей и повышают их долговечность // *Автомобильные дороги*. – 1959. – № 11. – С. 15-16.
24. Волоцкий Д. В. Гидрофобизация грунтов кремнийорганическими жидкостями при строительстве автомобильных дорог // *Изв. Вузов «Строительство и архитектура»*. – 1966. – № 2. – С. 100-105.
25. Мутуль А. Ф., Беляков Г.Г. Гидрофобизация минеральных компонентов строительных материалов на черных вязущих // Рига: Изд. АН Латвийской ССР, 1955. – 58 с.
26. Фройштетер Г.Б., Сергеев Г.И., Бочкарева Т.С. К вопросу повышения водоустойчивости торфяных брикетов // *Торфяная промышленность*. – 1964. – № 6.
27. Справочник по торфу / Под. Ред. А.В. Лазарева и С.С. Корчунова. – М.: Недра, 1982. – 760 с.
28. Проблемы физико-химической механики волокнистых и пористых дисперсных структур и материалов / Ред. коллегия: акад. П. А. Ребиндер и др. // *Материалы конференции 18–21 мая 1965*. – Рига: Изд-во «Зинатне», 1967. – 621 с.
29. Купорова А. В. Геотехнологическое обоснование производства гидрофобно-модифицированного кускового торфа в полевых условиях: дис. ... канд. техн. наук: 2.8.8. – ТвГТУ. Тверь, 2024. – 209 с.
30. Горфин О.С., Зайцев В.С. Технология переработки торфа. – М.: Недра, 1986. – 248 с.
31. Мисников О.С., Пухова О.В. Процессы переработки торфа и сапропеля. Тверь: ТвГТУ, 2014. – 164 с.



32. Лиштван И.И., Терентьев А.А., Базин Е.Т., Головач А.А. Физико-химические основы технологии торфяного производства. – Минск: Наука и техника, 1983. – 231 с.
33. Мисников О.С., Пухова О.В., Черткова Е.Ю. Физико-химические основы технологии торфяного производства. Тверь: ТвГТУ, 2015. – 168 с.
34. Афанасьев А.Е., Болтушкин А.Н. Процессы сушки дисперсных материалов. Тверь: ТвГТУ, 2011. – 152 с.
35. Антонов В. Я., Малков Л.М., Гамаюнов Н.И. Технология полевой сушки торфа. – М.: Недра, 1981. – 239 с.
36. Лиштван И. И. Исследование физико-химической природы торфа и процессов структурообразования в торфяных системах с целью регулирования их свойств: дис. ... д-ра тех. наук: 05.00.00. Калинин, 1969. – 844 с.
37. Абрамец А. М., Лиштван И.И., Чураев Н.В. Массоперенос в природных дисперсных системах // АН Беларуси. Ин-т пробл. использ. природ. ресурсов и экологии. – Минск: Навука і тэхніка, 1992. – 286 с.
38. Gamayunov N.I., Stotland D.M., Shekhab Kh.Yu. Influence of the dewatering regime on the structurization of natural capillary-porous materials. Colloid Journal. 1993; 5:35-44.
39. Gamayunov N.I., Gamayunov S.N. Mass transfer in peat. Eurasian Soil Science. 2005; 38(3):297-304.
40. Афанасьев А. Е., Чураев Н.В. Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства. – М.: Недра, 1992. – 288 с.
41. Афанасьев А. Е. Влияние капиллярного давления на структурообразование при сушке торфа // Коллоидный журнал. – 1989. – Т. 51. – № 1. – С. 3-10.
42. Misnikov O., Yablonev A., Kuporova A. Theories of peat systems structure formation and prospects for their practical use in the production of molded fuel. AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2526. – Article 040003. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0116108>
43. Купорова А. В. Процессы структурообразования в технологии добычи кускового торфа // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2022. – №4(16). – С. 25-35.
44. Долгов Б. И., Воронков М.Г. Применение кремнийорганических соединений для гидрофобизации материалов // Вестник ЛГУ. – 1954. – № 5. – С. 185-201.
45. Пашенко А.А. Исследования в области кремнийорганических гидрофобных покрытий. – М.: Наука, 1967. – 218 с.
46. Пашенко А.А., Воронков М.Г., Михайленко Л.А., Круглицкая В.Я., Лаская Е.А. Гидрофобизация. – Киев: «Наукова думка», 1973. – 240 с.
47. Пашенко А.А., Воронков М.Г., Михайленко Л.А. Гидрофобизация. – Киев: Наукова думка, 1986. – 238 с.
48. Афанасьев А.Е., Гамаюнов С.Н., Мисников О.С. Структурообразование при сушке сапропелей различной зольности // Коллоидный журнал. – 1999. – Т. 61. – № 3. – С. 303-308.
49. Афанасьев А.Е., Мисников О.С. Оценка структурных характеристик при сушке формованных органических и органоминеральных биогенных материалов // Теоретические основы химической технологии. – 2003. – Т. 37. – № 6. – С. 620-628.
50. Marinova Krastanka, G. [et al.] Hydrophobization of Glass Surface by Adsorption of Poly (dimethylsiloxane). Langmuir. 2005; 21(25):11729–11737. DOI: 10.1021/la051690t
51. Мисников О.С., Купорова А.В. Технологические основы добычи гидрофобно-модифицированного кускового торфа // Горный журнал. – 2022. – № 12. – С. 34-39. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.06





# ASSESSMENT OF THE IMPACT OF HYDROPHOBICALLY-MODIFYING ORGANOSILICON ADDITIVES ON MASS TRANSFER AND COAGULATION STRUCTURE FORMATION IN PEAT SYSTEMS

Oleg S. Misnikov, Alexandra V. Kuporova

Tver State Technical University



## Article info

Received:  
25 September 2024

Revised:  
26 October 2024

Accepted:  
11 November 2024

**Keywords:** Peat briquettes, hydrophobization, molding, drying, drying intensity, mass transfer, structure formation, strength.

## Abstract.

The drying duration is the primary parameter determining the efficiency of peat production. Reducing dependence on unfavorable weather conditions in the field is possible by applying hydrophobic modification to the peat mass during its dispersion process prior to molding into peat briquettes. An evaluation of the impact of hydrophobic treatment with a water-ethylhydrosiloxane emulsion on the drying rate and the change in strength of peat briquettes from molding moisture content to equilibrium moisture content were carried out. Experiments determined that no negative effects on mass transfer processes occurred during the dewatering of modified peat systems. A theoretical justification was provided for the reduction in strength during the coagulation structure formation of molded peat samples. The magnitude of the strength reduction is not critical for peat production technologies. An additional positive effect of using the hydrophobic agent was identified – a reduction in the initial molding moisture content of peat briquettes. These studies form the scientific basis for increasing the efficiency of peat briquette production technologies in field conditions.

**For citation** Misnikov O.S., Kuporova A.V. Assessment of the impact of hydrophobically-modifying organosilicon additives on mass transfer and coagulation structure formation in peat systems. *Journal of mining and geotechnical engineering*. 2024;4(27):47-65. DOI: 10.26730/2618-7434-2024-4-47-65

## References

1. Murko E.V., Markov S.O., Tyulenev M.A. Investigation of coal sludge dewatering of coal preparation plants. *Journal of mining and geotechnical engineering*, 2024;1(24):58-76. [In Russ.].
2. Makridin E.V., Markov S., Murko E., Ondrejmskova I. Open pit mine wastewater filtration in the overburden rock debris: case study. *E3S Web of Conferences*. 2021;303:01033. DOI:10.1051/e3sconf/202130301033.
3. Barnat-Hunek, D., Grzegorzczak-Frańczak, M., Suchorab, Z. Surface hydrophobization of mortars with waste aggregate by nanopolymer triethoxy-isobutyl-silane and methyl silicon resin. *Construction and Building Materials*. 2020;264:120175. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120175
4. Grabowska, K., Koniorczyk, M. The effect of hydrophobic treatment by organosilicon admixtures of cement mortar. *Cement, Wapno, Beton*. 2019;2019(4):320-329. DOI: 10.32047/CWB.2019.24.4.7
5. Ghasemlou, M., Daver, F., Ivanova, E.P. [et al.] Bio-inspired sustainable and durable superhydrophobic materials: From nature to market. *Journal of Materials Chemistry A*. 2019;7(28):16643-16670. DOI: 10.1039/c9ta05185f
6. He, Y. [et al.] Mechanism and working performance of organic silicone microcapsule powder water-repellent. *Journal of Building Materials*. 2015;18(3):433-437. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2015.03.013
7. Bulkakov V.Y., Lopatin Y.T. Hydrophobization of textolites by polyorganosiloxanes. *Plastic Masses*. 1966;1:69-70. [In Russ.].
8. Polyfunctional Organoelement Coatings / Ed. by A.A. Pashchenko. Kiev: Vishcha Shkola publishing house, 1987, 198 p. [In Russ.].
9. Andreeva A.B. Plasticizing and hydrophobizing additives in concrete and mortars. Moscow: Vysshaya Shkola publishing house, 1988, 55 p. [In Russ.].
10. Sobolevskiy M.V., Muzovskaya O.A., Popeleva G.S. Properties and Applications of Organosilicon Products. Moscow: Khimiya publishing house, 1975, 296 p. [In Russ.].



11. Higerovich M.I., Bayer V.E. Hydrophobic-plasticizing additives for cements, mortars and concretes. Moscow: Stroyizdat publishing house, 1979, 179 p. [In Russ.].
12. Krivenko Yu.Yu., Vezentsev A.I. Hydrophobization of fine chalk. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2021;6:63-70. [In Russ.].
13. Zubets V.N., Latkin A.S., Sazhin V.S., Ippolitov E.G., Yudakov A.A. Hydrophobization of dispersed materials. Vladivostok: Far East Branch of the USSR Academy of Sciences publishing house, 1987, 170 p. [In Russ.].
14. Izotov V.S., Sokolova Yu.A. Chemical additives for concrete modification. Moscow: Paleotype publishing house, 2006, 244 p. [In Russ.].
15. Stepanova, A.I. Calculation of the surface stresses of a ceramic plate in the drying process. *Industrial Heat Engineering*. 1982;2:22-25. [In Russ.].
16. Suvorov V.I., Khodiakov G.M., Terentyev A.A. et al. Study of the influence of various modifications of Hypaan on the qualitative parameters of lump peat. In: Physical bases of peat production. Kalinin: KSU publishing house. 1985, pp. 101-107. [In Russ.].
17. Sokolskiy, S.A.; Fedosov, S.V.; Sokolskiy, A.I.; Barulin, E.P. Thermal treatment and hydrophobization of fire-extinguishing powders. *Journal of Applied Chemistry*. 2005;78(4):681-683 [In Russ.].
18. Terentyev A. A., Nekrashevich V.M., Nekrashevich A.I., Prokhorov G.M. Structure formation of peat systems modified by non-ionogenic surfactants. *Peat Industry*. 1987;1:28-30. [In Russ.].
19. Portnov F.A. Hydrophobization of wood with phosphoric acid esters. *Nauchnoe Obozrenie = Scientific Review*. 2015;14:167-171. [In Russ.].
20. Shulgin, A.M.; Baranov, O.V.; Komarova, L.G.; Mezhuev, Ya.O. Modification of cellulose-based materials with hydrophobic alkoxyilan. *Adhesives. Sealants. Technologies*. 2024;7:23-28. [In Russ.].
21. Insulating slabs from peat: a collection of articles / ed. by L.I. Dlugatsky. Moscow & Leningrad: Mining Publishing House, 1932, 62 p. [In Russ.].
22. Sukhanov, M.A. Thermal insulation materials from peat. Moscow & Leningrad: Gosenergoizdat publishing house, 1960, 75 p. [In Russ.].
23. Kolbanovskaya A. S., Davydova A.R. Surface-active additives improve the properties of bituminous-mineral mixtures and increase their durability. *Automobile Roads*. 1959;11:15-16. [In Russ.].
24. Volotsky D. V. Hydrophobization of soils with organosilicon liquids during the construction of highways. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1966;2:100-105. [In Russ.].
25. Mutul A.F., Belyakov G.G. Hydrophobization of mineral components of building materials on black binders. Riga: Academy of Sciences of the Latvian SSR publishing house, 1955, 58 p. [In Russ.].
26. Froystetter G.B., Sergeev G.I., Bochkareva T.S. On increasing the water resistance of peat briquettes. *Peat Industry*. 1964;6. [In Russ.].
27. Reference book on peat / A.V. Lazarev and S.S. Korchunov (eds.). Moscow: Nedra publishing house, 1982, 760 p. [In Russ.].
28. Problems of physicochemical mechanics of fibrous and porous disperse structures and materials / Editors: Acad. P. A. Rebinder et al. // Proceedings of the Conference May 18-21, 1965. Riga: Zinatne publishing house, 1967, 621 p. [In Russ.].
29. Kuporova A. V. Geotechnological substantiation of the production of hydrophobic-modified lump peat in field conditions: PhD thesis. Tver, 2024, 209 p. [In Russ.].
30. Gorfin O.S., Zaitsev V.S. Technology of peat processing. Moscow: Nedra publishing house, 1986, 248 p. [In Russ.].
31. Misnikov O.S., Pukhova O.V. Processes of peat and sapropel processing. Tver: TvSTU publishing house, 2014, 164 p. [In Russ.].
32. Lishtvan I.I., Terentyev A.A., Bazin E.T., Golovach A.A. Physico-chemical bases of peat production technology. Minsk: Science and Technology publishing house, 1983, 231 p. [In Russ.].
33. Misnikov O.S., Pukhova O.V., Chertkova E.Yu. Physico-chemical bases of technology of peat production. Tver: TvSTU publishing house, 2015, 168 p. [In Russ.].
34. Afanasyev A.E., Boltushkin A.N. Processes of drying of dispersed materials. Tver: TvSTU, 2011, 152 p. [In Russ.].
35. Antonov V.Ya., Malkov L.M., Gamayunov N.I. Technology of field drying of peat. Moscow: Nedra publishing house, 1981, 239 p. [In Russ.].
36. Lishtvan I.I. Investigation of the physical and chemical nature of peat and structure formation processes in peat systems in order to regulate their properties: Dr.Sc. thesis. Kalinin, 1969, 844 c. [In Russ.].
37. Abramets A.M., Lishtvan I.I., Churaev N.V. Mass transfer in natural disperse systems. Minsk, Academy of Sciences of Belarus. Institute of Problems of Natural Resources Use and Ecology: Navuka i tehnika publishing, 1992, 286 p. [In Russ.].



38. Gamayunov N.I., Stotland D.M., Shekhab Kh.Yu. Influence of the dewatering regime on the structurization of natural capillary-porous materials. *Colloid Journal*. 1993;5:35-44.
39. Gamayunov N.I., Gamayunov S.N. Mass transfer in peat. *Eurasian Soil Science*. 2005;38(3):297-304.
40. Afanasyev A.E., Churaev N.V. Optimization of drying processes and structure formation in peat production technology. Moscow: Nedra publishing house, 1992, 288 p. [In Russ.].
41. Afanasyev A.E. Influence of capillary pressure on structure formation during peat drying. *Colloid Journal*. 1989;51(1):3-10. [In Russ.].
42. Misnikov O., Yablonev A., Kuporova A. Theories of peat systems structure formation and prospects for their practical use in the production of molded fuel. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2526:040003. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0116108>
43. Kuporova A. V. Processes of structure formation in the technology of lump peat extraction. *Bulletin of Tver State Technical University. Series "Technical Sciences"*. 2022;4(16):25-35. [In Russ.].
44. Dolgov B. I., Voronkov M. G. Application of organosilicon compounds for hydrophobization of materials. *Bulletin of Leningrad State University*. 1954;5:185-201. [In Russ.].
45. Pashchenko A.A. Investigations in the field of organosilicon hydrophobic coatings. Moscow: Nauka publishing house, 1967, 218 p. [In Russ.].
46. Pashchenko A.A., Voronkov M.G., Mikhailenko L.A., Kruglitskaya V.Ya., Lasskaya E.A. Hydrophobization. Kiev: Naukova Dumka publishing house, 1973, 240 p. [In Russ.].
47. Pashchenko A.A., Voronkov M.G., Mikhailenko L.A. Hydrophobization. Kiev: Naukova Dumka publishing house, 1986, 238 p. [In Russ.].
48. Afanasyev A.E., Gamayunov S.N., Misnikov O.S. Structure formation during drying of sapropels of different ash content. *Colloid Journal*. 1999;61(3):303-308. [In Russ.].
49. Afanasyev A.E., Misnikov O.S. Estimation of structural characteristics during drying of molded organic and organomineral biogenic materials. *Theoretical bases of chemical technology*. 2003;37(6):620-628. [In Russ.].
50. Marinova Krastanka, G. [et al.] Hydrophobization of Glass Surface by Adsorption of Poly (dimethylsiloxane). *Langmuir*. 2005;21(25):11729-11737. DOI: 10.1021/la051690t
51. Misnikov O.S., Kuporova A.V. Technological bases of extraction of hydrophobic-modified lump peat. *Mining journal*. 2022;12:34-39. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.06 [In Russ.].

### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Information about the authors

**Oleg S. Misnikov**, Dr.Sc. (Tech.), Professor; Dean of the Faculty of Nature Management and Engineering Ecology, Head of the Department of Mining, Environmental Engineering and Industrial Ecology  
e-mail: oleg.misnikov@gmail.com

**Alexandra V. Kuporova**, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Technological Machines and Equipment  
e-mail: a-kuporova@inbox.ru

Tver State Technical University  
22 Af. Nikitin embankment, 170026, Tver, Russian Federation